

## Problem Set #1

### LEPI과 SLC에서 Z보존 생성과 붕괴를 통한 전기약작용 이론의 검증

유럽 CERN의 LEP과 미국 SLAC의 SLD실험은 전자와 양전자의 충돌을 통한 Z 보존의 생성과 두 페르미온 입자쌍  $f\bar{f}$  ( $f = b, c, s, u, d, e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )로의 붕괴과정을

$$e^-(k, \sigma) + e^+(\bar{k}, \bar{\sigma}) \rightarrow Z \rightarrow f(p, \lambda) + \bar{f}(\bar{p}, \bar{\lambda}) \quad (1)$$

을 정밀하게 연구하였다. [ $\sigma, \bar{\sigma}, \lambda, \bar{\lambda}$ 는 각 입자의 1/2단위의 헬리시티(helicity)다.] 전자와 페르미온 질량은 Z 보존 질량에 해당하는 약 91 GeV의 충돌에너지에 비해 매우 작으므로 무시한다. 전기약작용이론에 따르면 Z 보존과  $f$ 의 상호작용은

$$\mathcal{L}_{Zff} = -gz\bar{f}\gamma_\mu(C_L^f P_L + C_R^f P_R)f Z^\mu \quad \text{with} \quad C_L^f = I_3^f - Q_f \sin^2 \theta_W, C_R^f = -Q_f \sin^2 \theta_W \quad (2)$$

로 기술된다.  $Q_f$ 는 양성자 전하를 단위로 한 페르미온의 전하(예를 들어 전자는 -1)이고  $I_3^f$ 는  $u, c, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  대해서는 1/2이고  $d, s, b, e, \mu, \tau$ 에 대해서는 -1/2로 주어진다. 또한  $P_{L,R}$ 는 각각  $(1 \mp \gamma_5)/2$ 로 카이랄 투사 연산자라 불린다.

1. 각 페르미온 입자의  $C_L^f$  와  $C_R^f$  값을  $\sin^2 \theta_W = 0.23$ 을 택하여 계산하라.
2. 전자를 왼쪽/오른쪽 편극시킨 상태로  $Z$  보존을 생성하여 얻은 편극 비대칭량

$$\mathcal{A}_{LR}^e = \frac{\sigma(e_L^- e^+ \rightarrow Z) - \sigma(e_R^- e^+ \rightarrow Z)}{\sigma(e_L^- e^+ \rightarrow Z) + \sigma(e_R^- e^+ \rightarrow Z)} \quad (3)$$

을 측정할 수 있다. 이 편극 비대칭량  $\mathcal{A}_{LR}^e$  을  $C_{L,R}^e$  로 표현하고 그 값을 구체적으로 구하라.

3. 생성된 페르미온의 전자의 운동량 방향에 대한 산란각을 고려하여 앞쪽과 뒤쪽으로 산란되는 비율의 비대칭성  $\mathcal{A}_{FB}$ 을 측정할 수 있다. 이 앞/뒤 비대칭량(FB asymmetry)을 구하고 각각의 페르미온에 대해 그 값을 계산하라.
4.  $Z$  보존 붕괴에 의해서 생성된 입자가  $\tau$  경입자이면 이  $\tau$  입자의 붕괴과정을 통하여  $\tau$  입자의 편극을 측정할 수 있다. 이를 통하여 측정할 수 있는 편극 비대칭성을 정의하고 계산하라.
5. 위의 다양한 독립적인 방법에 의해 전자기약작용의 중요한 물리량인  $\sin^2 \theta_W$ 를 측정할 수 있다. 각각의 측정실험의 CERN과 SLAC에서 진행 과정에 대해 좀 더 상세하게 알아 보아라.

## Problem Set #2

### W 보손 질량 : 횡질량(transverse mass)과 야코비안 피크(Jacobian peak)

전기약작용이론(electroweak theory)가 예측한  $W^\pm$  와  $Z$  보손의 존재는 1983년 CERN에서 양성자-반양성자충돌을 이용한 UA1 과 UA2 실험에서 발견된 후 (1984년 노벨 물리학상: 루비아와 반데어미어),  $W$  보손의 질량을 측정하기 위해 쿼크와 반쿼크의 충돌을 통한  $W^+$  보손의 생성과 붕괴과정

$$q + \bar{q}' \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e \quad (1)$$

이 정밀하게 연구되어 왔다.

1. 위와 같이  $W$  보손이 렙톤으로 2체 붕괴할 때 전자의 횡운동량 크기  $P_{eT}$  에 대한 미분단면적이 다음과 같음을 보이고 처음 나타나는 야코비 항의 특이성(singularity)을 고려하여 운동량에 대한 사건분포를 개략적으로 예측해 보라.

$$\frac{d\hat{\sigma}}{dP_{eT}} = \frac{4P_{eT}}{s\sqrt{1-4P_{eT}^2/s}} \cdot \frac{d\hat{\sigma}}{d\cos\theta^*} \quad (2)$$

여기서  $P_{eT}(\equiv |\vec{P}_e| \sin\theta^*)$  와  $\theta^*$  는 각각 두 경입자의 질량중심계에서의 전자의 횡운동량(transverse momentum) 크기와 극각(polar angle)을 나타낸다.

2.  $W$  보손 붕괴 시에 보이는 두 경입자 운동량 중에 실제로 관측 가능한 것이 무엇인지를 밝히고,  $Z$  보손의 질량 측정방법과 비교하여  $W$  보손의 질량 측정에는 어떠한 차이점이 있는지를 논하라.
3. 실제  $W$  보손이 붕괴할 때 다음과 같이 정의된 두 경입자 횡질량(transverse mass)의 최대값이  $W$  보손 질량과 같음을 보여라.

$$m_{e\nu T}^2 = (E_{eT} + E_{\nu T})^2 - (\vec{P}_{eT} + \vec{P}_{\nu T})^2 \leq m_W^2 \quad (3)$$

4. 반응과정 (1)에 대한 경입자 횡질량 분포가 다음과 같이 주어짐을 보여라.

$$\frac{d\hat{\sigma}}{dm_{e\nu T}^2} = \frac{|V_{qq'}|^2 G_F^2}{8\pi} \cdot \frac{m_W^4}{(s - m_W^2)^2 + m_W^2 \Gamma_W^2} \cdot \frac{(2 - m_{e\nu T}^2/s)}{\sqrt{1 - m_{e\nu T}^2/s}} \quad (4)$$

여기서  $V_{qq'}$  와  $G_F$  는 각각 CKM 행렬의  $[qq']$  성분과 페르미 상수를 나타낸다.